干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY



# 青藏高原东北部区域持续性低温事件的特征及影响因子分析

张调风[1,2]，杨昭明[1,2]，温婷婷[1,2]，来晓玲[1,2]，马有绚[1,2]
(1. 青海省气候中心，青海 西宁 810001；2. 青海省防灾减灾重点实验室，青海 西宁 810001)

**摘 要**：利用1960—2020年青藏高原东北部66个观测站日最低气温资料和NCEP/NCAR逐日再分析资料，根据百分位法确定了32个区域持续性低温事件，并对该事件发生的概率分布及影响其发生的主要环流系统进行了分析，同时探讨了冬季气候指数的极端性与低温事件发生的关联性。结果表明：(1) 区域持续性低温事件主要集中在东部农业区。(2) 不同类型低温事件环流差异主要表现在高层500 hPa高度场正异常中心和负异常中心的纬度位置以及700 hPa北风分量向南延伸的强度。(3) 冬季极涡、印缅槽、高原高度场、高原加热场、AO的极端性与区域性极端低温事件的发生相对应，低温事件的发生概率均超过60%，利用它们可以提升高原区域持续性低温事件的诊断和预测能力。

**关 键 词**：区域持续性低温事件；环流异常；气候指数；青藏高原东北部
**文章编号**：

21世纪以来，青藏高原地区增暖趋势比其他地区显著，表现更敏感[1-3]，致使极端气候事件的频率和强度有所增加[4-5]。极端气候事件的突发性和破坏性给农牧业生产以及国民经济造成了巨大的损失[6-7]，比如2008年冬季低温雨雪天气及2018年冬季强降雪事件，这些异常事件对生态系统的影响引起了众多学者对低温事件的广泛关注[8-12]。针对持续性低温事件的研究，主要集中在以下两方面：第一是对低温事件的客观识别、影响范围的空间型分布等方面开展了大量研究[8,13-16]，总结了全国不同分布型低温事件的特征及关键影响环流系统和外强迫条件，表明持续性低温事件的区域性特征以及影响环流系统较为显著。第二是气候指数的极端性对低温事件发生的影响。研究表明，北极涛动(Arctic Oscillation，简称AO)，当AO为负位相时，中国大部分地区冬季的气温降偏低[17-19]。沈柏竹等[20]研究表明，北极涛动指数下降、极涡面积指数上升有利于冬季气温异常偏低。时盛博等[21]认为，极涡面积异常、热带北大西洋海温异常及高原指数异常对青藏高原东北部冷空气次数和强度有显著的影响。由此可见，不同区域的关键气候影响指数略有不同，但目前多数研究主要是围绕国内大范围的低温事件展开，不能完全反映区域性低温事件的特征，尤其是气候条件复杂的高原地区，也无法满足高原地区气象预报服务的需求。因此，需要更细致地分析全球变暖背景下高原东北部持续性低温事件的分布规律，并寻找低温事件发生的诱因、找出低温事件的延伸期预报方法，做好预报服务工作。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

青藏高原东北部属于农牧业交错地带，其范围处在30°~40°N、89°~105°E之间，行政区划上包括青海省以及甘肃省主要的牧业区，属于典型的气候过渡带(图1)，是我国重要生态屏障区的重要组成部

**收稿日期**：2020-07-15； **修订日期**：2020-12-29
**基金项目**：中国气象局气候变化专项(CCSF202021)；国家自然科学基金项目(41861013，42071089)资助
**作者简介**：张调风(1985-)，女，硕士，工程师，主要从事气候预测及气候变化研究. E-mail: ztf_qhzx@163.com
**通讯作者**：温婷婷(1992-)，女，硕士，助理工程师，主要从事高原地区气候变化及异常诊断研究. E-mail: 790662339@qq.com

图1 研究区域示意图

Fig. 1 Overview map of the study area

分，海拔高度介于1581~6584 m。受其气候变化的复杂性和特殊地理位置的影响，气候变化空间差异较大，尤其在气候变暖背景下，研究该区持续性极端低温事件的分布特征以及与极端气候指数的关联，以期为该区域农牧业生产、气象灾害预警以及进一步提升生态气象服务保障能力提供一定的参考依据。

### 1.2 数据来源

（1）气温资料来自青海省和甘肃省信息中心提供的青藏高原东北部66个气象站，主要为1960年9月至2020年3月的逐日最低气温数据，数据中经过了均一化质量控制，满足三性要求。

（2）环境变量采用NCEP/NCAR逐日格点再分析资料[22]，水平分辨率为2.5°×2.5°，垂直分辨率为17层，所用物理量为500 hPa位势高度场、700 hPa温度场和风场。环流因子数据采用国家气候中心的74项环流指数；高原加热场、西伯利亚高压采用文献[23]中的方法计算。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 区域持续性低温事件** 参考Zhang等[24]的定义，根据1960年9月至2020年3月逐日最低气温资料，选取单站某日及其前后各5 d的最低气温，逐年相连接，得到11 d×60 a=660 d的最低气温序列，将此序列按升序排序，利用百分位法，选取10%百分位值作为此站该日发生极端低温事件的判断阈值，当日最低气温若连续5 d或连续7 d中有5 d或以上低于此阈值，则为低温日，且期间只允许连续发生1 d间断（即某日日最低气温大于阈值），则认为该站发生了一次持续性异常低温事件。当在同一时段内至少5 d有相邻10站同时发生单站持续低温事件，定义为研究区内发生了一次区域持续性低温事件。

**1.3.2 综合强度指数CI** 根据钱维宏[25]的研究方法，主要选取低温的持续时间指数、影响范围指数、低温强度指数计算了区域持续性低温事件的综合强度，具体表示如下：

持续时间指数表示区域持续性低温事件从开始到结束的总天数。影响范围指数表示区域持续性低温事件过程中发生持续性低温事件的最大单站数。低温强度指数表示区域持续性低温事件过程中发生持续性低温事件的单站最低气温距平平均值的最小值。

$$C_j = D_j + E_j - I_j \quad (1)$$

式中：$C_j$表示第$j$次持续性低温事件的综合强度指数；$D_j$为第$j$次事件标准化的持续性时间指数；$E_j$为第$j$次持续性低温事件的影响范围指数；$I_j$为第$j$次持续性低温事件的低温强度指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 区域持续性低温事件的分布及其环流特征

利用区域持续性低温事件的判断方法对青藏高原东北部1960—2020年当年10月至次年2月的逐日最低气温进行判断，共计算得到区域性极端低温事件32次（表1）。按照表1中所给出的低温事件计算各站点出现频率。图2是各站点出现低温的频率，从中可以看出，频率高的区域主要集中在35°N以北，频率大于30%的区域分布在100°E以东的农

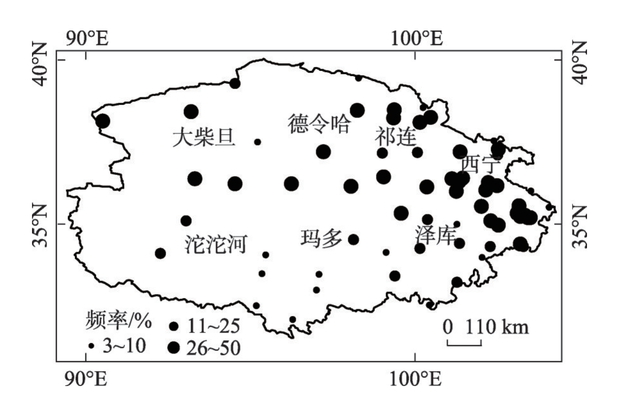



图2 各站点出现持续性低温事件的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of persistent low temperature events in each station

业区。南部站点出现低温事件的频率主要是10%以下。

北半球中高纬度环流系统的变化会直接影响到青藏高原东北部天气气候的变化，因此这里对挑选出的32个持续性低温事件发生期的500 hPa高度场、700 hPa风场及平均气温场进行了合成分析，进一步分析持续性低温事件发生时的环流形势（图3）。从图3可以看出，高层500 hPa位势高度场正异常中心和低层700 hPa气温场暖异常中心一致，主要位于西伯利亚地区，约48°~68°N的区域内，高层位势高度负异常中心和冷异常中心主要位于中国中北部，约30°~47°N的区域内，我国大部主要受到西伯利亚地区异常反气旋的前部偏北气流影响。进一步分析可知，正是由于这种环流特征的出现与维持引导冷空气南下，致使低温事件发生，区别于与阻高系统崩溃造成的典型寒潮系统[16]。

## 2.2 个例分析

在分析影响区域持续性低温事件发生的环流特征的基础上，这里以典型个例为着手点，进一步了解大气和海洋的耦合特征。选取了1975年12月8日至22日和2008年1月26日至2月8日两次综合强度指数最大的低温事件，综合强度指数分别为7.2、4.5，持续时间均在10 d以上，从图4可以看出，2次低温事件过程最大累计降温程度均在30 °C以上。

根据学者的研究[8,26-27]，强La Nina事件发生的当年冬季，亚洲中高纬经向型环流较强，容易在高纬度—极地形成脊区，有利于脊前冷空气南下，从而导致中国中北部大部气温偏低，而1975年和2008年冬季正是中等强度的La Nina事件年。

从图5可以看出，2次典型低温事件发生时高层环流均表现为由西北向东南传播的波列形态[20]，北

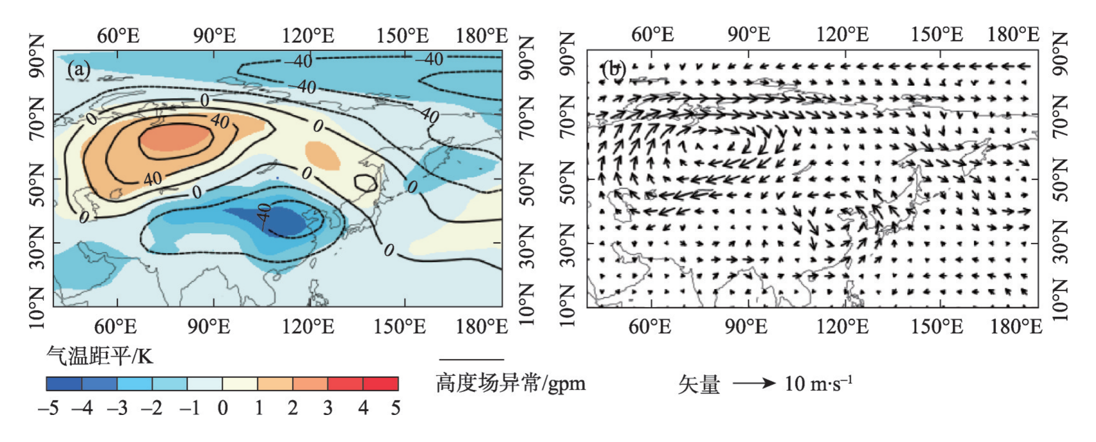



图3 低温事件发生期700 hPa气温场异常和500 hPa高度场异常的合成结果(a)、700 hPa风场异常(b)

Fig. 3 Composite results about anomalies of temperature in 700 hPa, geopotential height in 500 hPa(a) and winds in 700 hPa(b) in low temperature occurring

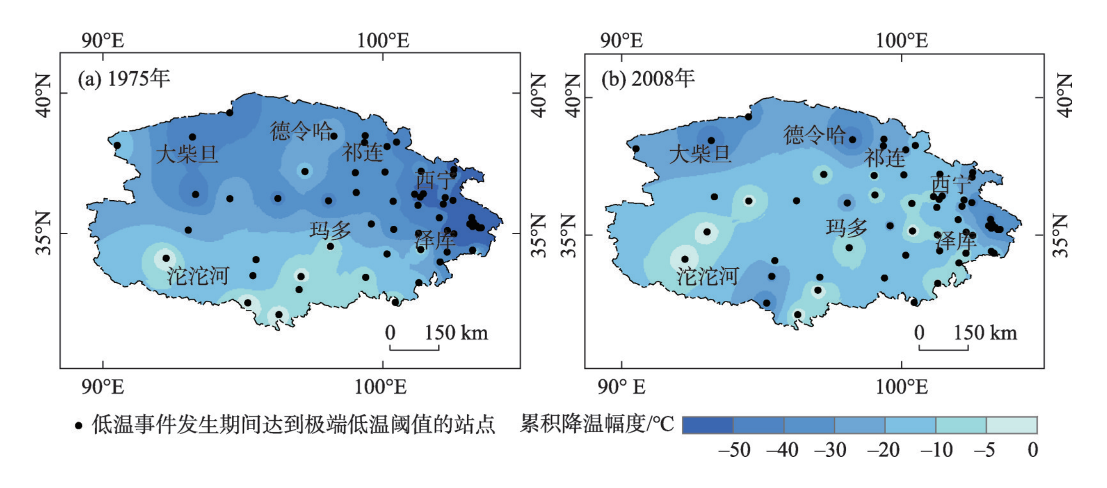
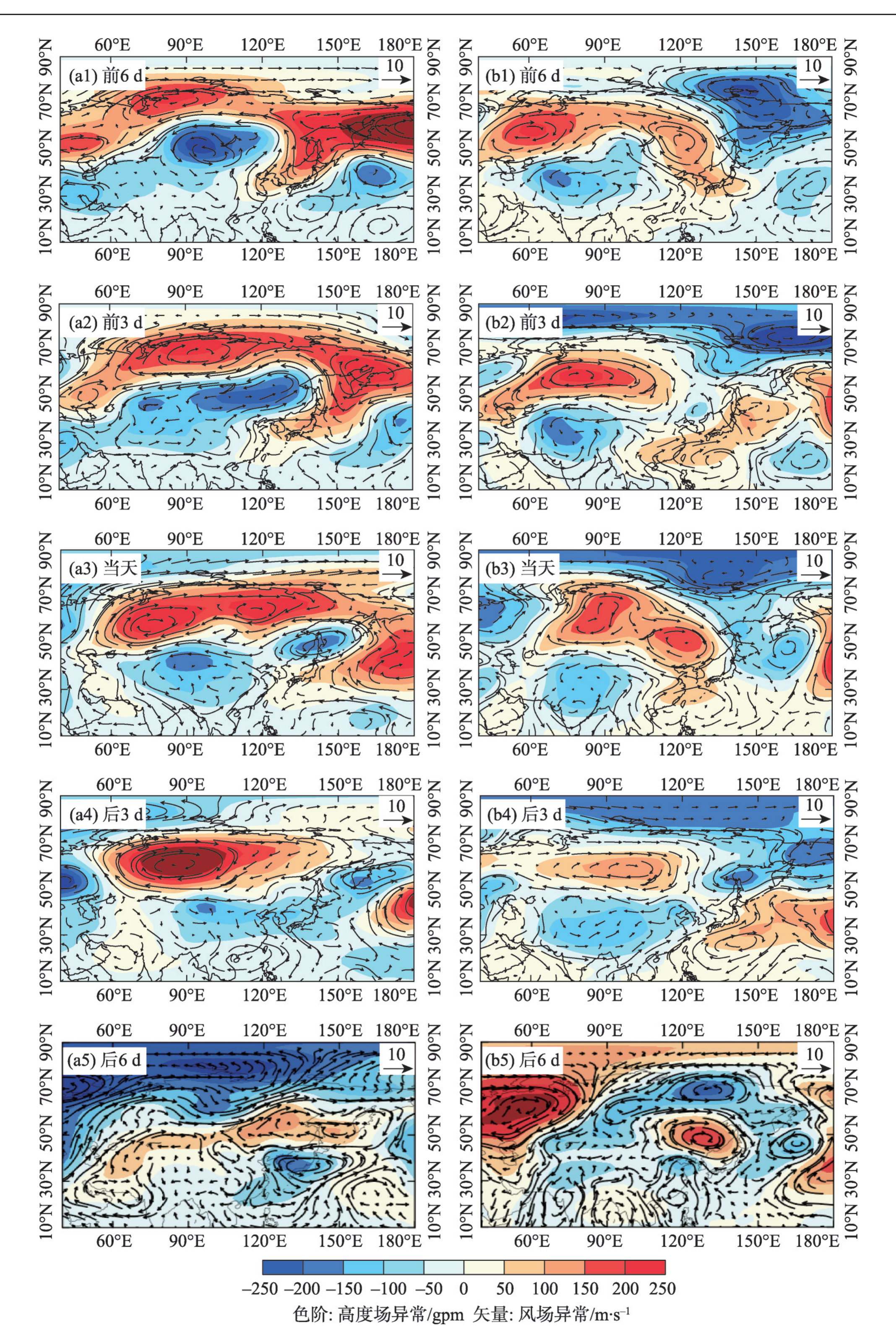



图4 2次典型低温事件开始时的最大影响范围

Fig. 4 Distribution of sites with the maximum influence range of two typical low temperature events




注：a1~a5依次为1975年低温发生前6 d、前3 d、当天、后3 d、后6 d；b1~b5类似，但为2008年。

图5　500 hPa高度场异常和700 hPa风场异常

Fig. 5　Composite results about anomalies of geopotential height in 500 hPa and wind in 700 hPa

高南低环流形势的稳定维持有助于冷空气持续，并南下至我国[28]。同时，青藏高原地区是一个明显的负异常中心。不同之处表现在高层500 hPa高度场正异常中心和负异常中心的纬度位置有所不同，同时低层700 hPa北风分量向南延伸的强度也不同；1975年正异常中心主要在乌拉尔山地区附近，有利

于乌拉尔山阻高形成，2008年的正异常中心主要在贝加尔湖地区。

由此可以看出，这与500 hPa高度场有关的各种环流因子密切相关，如贝湖高压、极涡面积、北极涛动指数AO对区域性的低温事件发生影响不小，同时与青藏高原的加热场、海温相关的NINO 3.4海温指数也有关，需要进一步了解这些环流因子的异常特征对低温的影响。

### 2.3 区域性低温事件的影响因素分析

从表1中32个低温事件发生的时间特征来看，季节内发生的次数也不同，10、11、12、1、2月发生低温次数分别为4、9、7、7、5次，11—1月次数较高。1998年以后发生了4次低温事件，1998之前有18次，这与全球增暖有一定的联系[8]。这里重点揭示各类气候指标的异常强度对高原东北部区域性低温事件的影响。

各气候指数的极端性分别用符号“1”、“0”、“-1”表示（表1）。“0”和“1”表示气候指数的异常状态有利于低温的出现，其中“1”表示气候指数达到了0.5倍标准差异常状态，“0”为正常态；“-1”表示与指数的符号相反，不利于低温出现。从中可以看出，东亚槽偏西、印缅槽偏强、西太平洋遥相关指数偏强、冬季风指数偏强及高原高度场异常偏低达到极端性时，发生区域性极端低温事件的概率在60%以上[20]；亚洲极涡偏强、东亚槽偏强、北极涛动指数偏弱、高原加热场偏强、西伯利亚高压偏强的概率达到了50%。

综合以上分析，La Nina海温背景下，当AO指数为负时，极涡会偏强，欧亚中高纬度高层高度场以北正南负为主[20]，与此同时乌山阻高和贝湖阻高偏强、东亚槽偏西偏强、中低纬度区域受高度场负异常影响促使高原高度场偏低，这些环流系统均有利于区域性极端低温事件的发生，同时也表明，区域性低温事件的发生是多种气候因素的异常状态协同作用的结果。

从环流极端性的角度理解区域性极端事件，选取极涡强度、高原高度场、印缅槽、北极涛动指数和高原加热场这5个不同影响机理的指数作为研究对象，看他们达到气候异常时，是否对应有区域性极端低温事件发生。这里气候指数的极端性判定标准根据王晓娟等[8]的研究为依据，即以15%（85%）百分位值作为划分标准。从5个指数的平均值达到极端阈值时低温事件的发生情况来看（表2）。极涡强度、印缅槽、高原高度场、AO指数极端指数年发生区域性极端低温事件的概率均在67%（6 a/9 a），高原加热场的极端指数年发生区域性极端低温事件的概率为63%（5 a/8 a），基本都超出了60%，这与沈柏竹等[20]的结论一致。由此可知，一方面有可能是某个起主导作用的单因子达到极端异常引起区域性低温事件的发生，另一方面，在单因子未达到极端异常的情况下，多种因子异常的共同作用同样会诱使低温事件的发生。预报服务业务中有可能从主要影响因子极端性的角度对区域低温事件进行预报服务。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

积雪、冷空气、海冰、海温等多个因子的协同变化会造成一个地区气温异常。本文以典型低温事件为入手点，大尺度归纳总结了不同类型低温事件发生前后环流系统以及气候指数的极端性对区域低温事件发生的影响，但缺乏小尺度因子对区域低温事件的影响研究，根据相关学者研究，山脉之间形成的不同角度夹角易形成“易进难出”型[29-30]的外围地形特征，造成冷空气的堆积，会加重局部地区低温冻害的危害，尤其在青藏高原地区这种地形起伏差异较大区域，像地形这种小尺度的影响因子还需进一步研究。同时，文中对不同类型低温事件发生时的环流异常进行了分析，但如何应用这种诊断规律对低温事件进行准确预测并将其应用到业务中还有待进一步探讨。

低温事件引起的灾害风险影响评估也是未来研究的一个重点方向。21世纪以来，青藏高原地区增暖趋势较全国其他地区较为显著，而且未来，高原地区气温仍属于增暖态势[31]，生态系统会逐渐适应温暖的气候，对极端低温事件的脆弱性逐渐增加，一旦发生持续性低温事件、寒潮等极端低温事件将会对生态系统的结构和功能造成巨大而深远的影响[32]。因此，需要重点关注高原地区生态系统对极端低温事件适应性的评估工作。

### 3.2 结论

（1）区域持续性低温事件主要集中在气候变暖前，低温事件发生的密集区主要集中在东部农

表1　1961—2019年冬季表征区域性极端低温事件的3个指标及其与各环流指数异常值的联系

Tab. 1　Three indicators representing regional extreme low temperature events in winter and their relationship with the outliers of various circulation indexes in 1961—2019

| 开始日期 | 持续天数 | 极涡面积 | 极涡强度 | 东亚槽位置 | 东亚槽强度 | 高原高度场 | 印缅槽 | 北极涛动 | 西太平洋遥相关型指数 | NINO 3.4海温 | 高原加热场 | 西伯利亚高压 | 冬季风 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1961-02-11 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1961-12-05 | 8 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1962-11-25 | 11 | 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 1 |
| 1962-12-29 | 19 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 |
| 1963-10-12 | 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1963-12-22 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 1964-01-27 | 7 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 1965-10-12 | 7 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 |
| 1967-01-01 | 5 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1967-11-28 | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 1 |
| 1968-02-06 | 5 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 | 1 |
| 1968-02-17 | 5 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 | 1 |
| 1969-11-29 | 6 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 1971-01-29 | 11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 1972-10-20 | 9 | 0 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 1972-11-15 | 6 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 1975-12-08 | 15 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 1976-11-16 | 12 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 |
| 1979-11-17 | 8 | -1 | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 1980-02-02 | 6 | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 |
| 1981-10-21 | 5 | 0 | -1 | 0 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 1 |
| 1981-12-18 | 5 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1982-11-28 | 6 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 |
| 1991-12-27 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 1992-11-08 | 5 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 1993-01-14 | 14 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 1995-01-02 | 6 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 1996-12-09 | 5 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | -1 |
| 2002-01-13 | 5 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | -1 |
| 2004-02-03 | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 2008-01-26 | 14 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 |
| 2009-11-16 | 7 | -1 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 |
| (正异常态+正常态)/正异常态 | | 21/5 | 18/8 | 20/5 | 17/4 | 29/17 | 25/14 | 16/6 | 21/6 | 19/3 | 16/8 | 16/8 | 21/12 |

注：1表示正异常，对区域性低温事件为正贡献；0表示与1符号一致的正常态；-1表示负异常，对区域性低温事件为负贡献。

业区。

（2）青藏高原东北部低温事件发生期环流特征主要为：高层500 hPa位势高度场正异常中心和低层700 hPa异常暖中心一致，主要在西伯利亚地区，48°~68°N区域内，高层位势高度负异常中心和低层冷异常中心主要在中国中北部地区，30°~47°N区域内。

（3）东亚槽偏西、高原高度场偏低、印缅槽偏强、冬季风指数偏强及西太平洋遥相关指数偏强与区域性极端低温事件的发生一致。冬季各个指数达到极端指数时，发生区域性极端低温事件的概率在60%以上。因此可以从其极端性出发，为高原区

表2 冬季5种指数达到极端阈值(15%)与区域性极端低温事件的一致性

Tab. 2 Consistency of the 5 indexes in winter reaching the extreme threshold(15%) and the regional extreme low temperature events

| 极涡强度 | | 高原高度场 | | 印缅槽 | | 北极涛动(AO)指数 | | 高原加热场 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 达到阈值年份 | 对应事件 | 达到阈值年份 | 对应事件 | 达到阈值年份 | 对应事件 | 达到阈值年份 | 对应事件 | 达到阈值年份 | 对应事件 |
| 1965 | √ | 1961 | √ | 1961 | √ | 1962 | √ | 1961 | √ |
| 1968 | √ | 1962 | √ | 1962 | √ | 1965 | √ | 1962 | √ |
| 1970 | | 1963 | √ | 1964 | √ | 1968 | √ | 1963 | √ |
| 1971 | √ | 1967 | √ | 1967 | √ | 1969 | √ | 1965 | √ |
| 1972 | √ | 1968 | √ | 1970 | | 1976 | √ | 1967 | √ |
| 1977 | | 1970 | | 1971 | √ | 1984 | | 2007 | |
| 1978 | | 1973 | | 1973 | | 1985 | | 2011 | |
| 1993 | √ | 1974 | | 1974 | | 2000 | | 2012 | |
| 1996 | √ | 1975 | √ | 1975 | √ | 2009 | √ | – | |

注:√ 表示这一年出现了区域性极端低温事件。

域性持续低温事件的预测服务及研究等提供一定的科学依据。

## 参考文献(References)


[1] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近50年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1969–1975. [Han Guojun, Wang Yulan, Fang Shibo. Climate change over the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts on local agriculture and animal husbandry in the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1969–1975. ]

[2] 张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3036–3047. [Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3036–3047. ]

[3] Dong B W, Sutton R T, Chen Wei, et al. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over northeast Asia since the mid-1990s: Drivers and physical processes[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(9): 1005–1023.

[4] 赵雪雁, 雒丽, 王亚茹, 等. 1963—2012年青藏高原东缘极端气温变化特征及趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2113–2122. [Zhao Xueyan, Luo Li, Wang Yaru, et al. Extreme temperature events in eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau from 1963 to 2012[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2113–2122. ]

[5] 冯晓莉, 刘彩红, 祁栋林. 青海省汛期极端强降水特征及影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(5): 125–130. [Feng Xiaoli, Liu Caihong, Qi Donglin. Characteristics of extreme heavy precipitation rvents and their impacts in Qinghai Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(5): 125–130. ]

[6] 黄浩, 张勃, 黄涛, 等. 近30 a甘肃省河东地区极端气温指数时空变化特征及趋势预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 319–328. [Huang Hao, Zhang Bo, Huang Tao, et al. Quantifying and predicting spatial and temporal variations in extreme temperatures since 1990 in Gansu Province, China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 319–328. ]

[7] 杨金虎, 靳荣, 刘晓云, 等. 西北地区东部汛期降水季节内分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 942–950. [Yang Jinhu, Jin Rong, Liu Xiaoyun, et al. Inter-seasonal distribution pattern of rainy season precipitation in the east region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 942–950. ]

[8] 王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 等. 中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数极端性的联系[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 1–11. [Wang Xiaojuan, Shen Baizhu, Gong Zhiqiang, et al. The classification of winter regional extreme low temperature events in China and their corresponding relationship to climatic indices extreme anomaly[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 1–11. ]

[9] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 近53年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 1013–1024. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 1013–1024. ]

[10] 孙华, 何茂萍, 胡明成. 全球变化背景下气候变暖对中国农业生产的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(7): 51–57. [Sun Hua, He Maoping, Hu Mingcheng. Impact of global climatic warming on agricultural production in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(7): 51–57. ]

[11] 杨贵名, 毛冬艳, 孔期. "低温雨雪冰冻"天气过程锋区特征分析[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 652–665. [Yang Guiming, Mao Dongyan, Kong Qi. Analysis of the frontal characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(4): 652–665. ]

[12] Bao Q, Yang J, Liu Y, et al. Roles of anomalous Tibetan Plateau

warming on the severe 2008 winter storm in central-southern China [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(6): 2375-2384.

[13] Gao H. China's snow disaster in 2008, who is the principal player? [J]. International Journal Climatology, 2009, 29(14): 2191-2196.

[14] 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2): 195-204. [Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Cui Donglin, et al. The identification and changing characteristics of regional low temperature extreme events[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(2): 195-204. ]

[15] 杨莲梅, 曾勇, 刘雯. 北疆冬季持续性低温事件特征及大气环流异常分析[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 508-518. [Yang Lianmei, Zeng Yong, Liu Wen. Characteristics of persistent low temperature events and analysis of atmospheric circulation anomaly in winter in northern Xinjiang[J]. Climate Change Research, 2016, 12(6): 508-518. ]

[16] 陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验[J]. 气象学报, 2017, 75(3): 400-414. [Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing, et al. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(3): 400-414. ]

[17] 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 429-434. [Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lyu Junmei. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on emperature increasing in north of east Asian winter[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 429-434. ]

[18] 龚道溢, 王绍武. 近百年来北极涛动对中国气候的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568. [Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter over China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 559-568. ]

[19] 丁文魁, 杨晓玲, 汪作成, 等. 河西走廊东部低温事件变化特征[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 17-24. [Ding Wenkui, Yang Xiaoling, Wang Zuocheng, et al. Variation characteristics of low temperature events in east of Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 17-24. ]

[20] 沈柏竹, 廉毅, 张世轩, 等. 北极涛动、极涡活动异常对北半球欧亚大陆冬季气温的影响[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 434-439. [Shen Baizhu, Lian Yi, Zhang Shixuan, et al. Impacts of Arctic Oscillation and polar vortex anomalies on winter temperature over Eurasian continent[J]. Climate Change Research, 2012, 8(6): 434-439. ]

[21] 时盛博, 张调风, 马占良, 等. 青藏高原东北部冷空气次数和强度变化的特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 232-243. [Shi Shengbo, Zhang Tiaofeng, Ma Zhanliang, et al. Variation characteristics of cold air processes in northeastern Tibetan Plateau[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 232-243. ]

[22] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437-471.

[23] 申红艳, 王冀, 马明亮, 等. 青海高原冬季持续低温集中程度的气候特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1394-1402. [Shen Hongyan, Wang Ji, Ma Mingliang, et al. Winter persistence low temperature concentration degree over the Qinghai Plateau: Climatic features and causes[J]. Journal of Glaclology and Geocryology, 2012, 34(6): 1394-1402. ]

[24] Zhang Z J, Qian W H. Identifying regional prolonged low temperature events in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(2): 338-351.

[25] 钱维宏. 中期-延伸期天气预报原理[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 265-279. [Qian Weihong. Principles of medium to extended range weather forecasts[M]. Beijing: Science Press, 2012: 265-279. ]

[26] 何溪澄, 李巧萍, 丁一汇, 等. ENSO暖冷事件下东亚冬季风的区域气候模拟[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 18-28. [He Xicheng, Li Qiaoping, Ding Yihui, et al. Numerical simulation of east Asian winter monsoon with ENSO episodes using a regional climate model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(1): 18-28. ]

[27] 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 不同类型ENSO对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 640-655. [Chen Wen, Ding Shuoyi, Feng Juan, et al. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the east Asian monsoon and their mechanisms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 640-655. ]

[28] 陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验[J]. 气象学报, 2017, 75(3): 400-414. [Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing, et al. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(3): 400-414. ]

[29] 黄寿波. 我国地形小气候研究概况与展望[J]. 地理研究, 1986, 5(2): 90-101. [Huang Shoubo. Advance in the investigation of the topographical microclimate in China[J]. Geographical Research, 1986, 5(2): 90-101. ]

[30] 吕炯. 地形与霜冻[J]. 地理学报, 1956, 22(2): 149-158. [Lyu Jiong. Topograpical features and frost damage[J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(2): 149-158. ]

[31] 胡芩, 姜大膀, 范广洲. CMIP5全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 924-938. [Hu Qin, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 924-938. ]

[32] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 近53年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 1013-1024. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 1013-1024. ]

# Characteristics and influencing factors of persistent low temperature events in northeast Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Tiaofeng[1,2], YANG Zhaoming[1,2], WEN Tingting[1,2],
LAI Xiaoling[1,2], MA Youxuan[1,2]

(1. Qinghai Climate Center, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Xining 810001, Qinghai, China)

**Abstract:** Based on daily minimum temperature data from 66 observation stations in winter in the northeast region of the Qinghai-Tibet Plateau, China from 1960 to 2020 and the NCEP/NCAR reanalysis product, this paper uses the percentile method to determine persistent low-temperature events, proposes criteria for low-temperature days and regional persistent low-temperature events, and discusses the extreme winter climate index and the relevance of incidents at low-temperature. The results show the following. (1) Regional persistent low-temperature events were primarily concentrated in the eastern agricultural area. (2) The differences between different types of low-temperature event circulations are primarily manifested in the latitudes of the positive and negative anomaly centers of the 500-hPa height field and the southward extension strength of the 700-hPa north wind component. (3) The polar vortex index, plateau region index, Indian-Burma Trough, Arctic Oscillation index, and plateau heating field reach 15% (or 85%) extreme thresholds, and the percentage occurrence of regional extreme low-temperature events exceeds 60%. Therefore, certain signals can be used for diagnosing and predicting the RELTE from index anomalies. In the context of climate warming, the distribution characteristics of persistent extreme low-temperature events in the northeast area of the Qinghai-Tibet Plateau and their correlation with extreme climate indexes were studied to provide references for agricultural and animal husbandry production, meteorological disaster early warning, and the further improvement of the ecological meteorological service guarantee capacity in this region.

**Key words:** regional persistent low temperature event; circulation anomaly; climate index; northeast of Qinghai-Tibet Plateau